

ケーブル絶縁材の健全性診断に向けた非破壊検査システム開発

Development of nondestructive inspection system for soundness diagnosis of cable insulating material

原子燃料工業(株)	藤吉 宏彰	Hiroaki FUJIYOSHI	Member
原子燃料工業(株)	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
関西電子ビーム(株)	川島 崇利	Takatoshi KAWASHIMA	
関西電力(株)	浦島 千裕	Chihiro URASHIMA	
関西電力(株)	鈎 忠志	Tadashi MAGARI	

Abstract

Insulation degradation of cable insulation causes fire due to electric leakage. Cable insulating materials laid in nuclear power plants deteriorate over time, heat and influence of radiation. Here we investigated the degradation tendency of insulating materials by radiation irradiation by hammering inspection using AE sensor. As a result, for any cable insulation material, curing of insulating material with irradiation could be detected as a change in natural frequency. From here, the applicability of AE hammering test as a sound inspecting method for cable insulation was confirmed.

Keywords: hammering test, AE sensor, non-destructive inspection, cable, insulating material

1. はじめに

原子力発電所で使用されるケーブルの多くは電気絶縁性の高い高分子が利用されているが、高分子は熱や放射線により次第に絶縁性能が低下する¹。

ケーブルの絶縁性能についてはその性能を損なうことなく、ケーブルを敷設状態のまま劣化度を測定する非破壊劣化診断技術の開発が進められている²。例えばIM法は破断伸びと高い相関性があり、絶縁材の劣化診断における有用性が示されているが、架橋ポリエチレンなど一部の絶縁材については十分な相関がみられていないものがある³。

そこで筆者らは上記の絶縁材を含む複数種類のケーブルに対して、AEセンサを用いた打音検査により、放射線による絶縁材の劣化検出を非破壊的に試みた。

2. 試験体の選定

試験体として、前章で述べた架橋ポリエチレン絶縁、および原子力発電所において絶縁低下の評価対象となっているエチレンプロピレンゴム絶縁⁴を含む3種類のケーブルおよび絶縁材と同じ材質の板材2種類を選定した。試験体の仕様をTable 1に、外観をFig. 1にそれぞれ示す。

なお、C-1, C-2は芯線を絶縁材で覆い、その外側は被覆により保護されている。また、C-3は絶縁材にのみ覆われている。

Table 1 Specification of samples

Sample type	Sample name	Material	Size(mm)
Cable	C-1	Insulating material : XLPE Sheath : vinyl	ϕ : 41 Length : 300
	C-2	Insulating material : EPM Sheath : CR	ϕ : 38.2 Length : 300
	C-3	Insulating material : XLPE Sheath : -	ϕ : 20 Length : 300
Plate	P-1	XLPE	\square : 100
	P-2	EPM	Thickness : 10

(XLPE : Cross-linked polyethylene, EPM : Ethylene propylene rubber, CR : Chloroprene rubber)



Fig. 1 Irradiation samples

3. 放射線照射

前章で示した試験体について、関西電子ビーム(株)が所有する 10MeV 電子線照射施設を用いて、電子線を照射した。本照射施設は、透過性、均一性に優れ、商用として国内最高の 10MeV 電子線照射が可能である⁵。

実機のケーブル布設環境を考慮すると劣化要因となる放射線はγ線が主と考えられる。

ケーブル絶縁材のような高分子材料において、γ線と電子線は吸収線量が同じであれば本質的には同じ効果を与える（二次電子による励起やイオン化の発生、それによるラジカルの生成）ことから⁶、本研究ではγ線と比較して短時間で照射可能な電子線を用いて実機環境を想定した絶縁材の劣化を評価する。

3.1 照射条件

電子線照射条件を Table 2 に示す。各照射条件において試験体 3 体ずつ照射した。

電子線照射は通常運転時の原子炉格納容器内ケーブル布設箇所周囲の平均線量率の最大実測値(0.29Gy/h)⁷を考慮し、1kGy を照射 1 回あたりの吸収線量（ここでは水の吸収線量相当。以降、「集積線量」という）とし、目標線量に達するまで繰り返し照射した。また、照射による内部導線の発熱による効果を確認するため、1kGy/回に加えて、電子線電流値を上げた 30kGy/回の 2 通りを設定した。

なお、絶縁材全周に均一に照射するため、試験体を回転させながら電子線を照射した。

Table 2 Irradiation condition

Integrated irradiation dose	1kGy/time	30kGy/time
Current value	1.73mA	10mA
Transport speed	15.00m/min	2.89m/min
Scan width	1100mm	1100mm
Total dose (kGy)	Number of irradiation	
0	0	0
50	67 (50)	—
100	133 (100)	—
200	267 (200)	—
300	400 (300)	—
400	553 (400)	—
500	667 (500)	22 (17)
1000	—	44 (33)
1500	—	67 (50)
2000	—	89 (67)

(注) 括弧内の数値は板材の照射回数

3.2 照射試験体の温度計測

照射による温度上昇に伴う絶縁材の劣化評価を目的として、温度計測用サンプルを用いて照射中のシース表面および芯線の温度計測を行った。結果を Table 3 に示す。1kGy/回と比較して 30kGy/回は温度上昇が顕著である。C-1,C-3 は耐熱試験温度以下、C-2 は耐熱試験温度付近まで上昇するものの、5 分程度で照射前と同程度まで低下した。これは絶縁材の耐熱試験時間（46 時間以上）と比較して十分短く、熱による絶縁材の影響は小さいと考えられる。

上記結果から、以降は放射線そのものによる劣化について評価する。

Table 3 Temperature measurement result

Sample Type	Sample name	Heat resistance test temperature ^{**}		Measuring position	Measured temperature [°C]	
		T[°C]	time [h]		1kGy /time	30kGy /time
cable	C-1	120	96	Surface	18	75
				Core wire	20	80
	C-2	100	48	Surface	19	100
				Core wire	21	100
	C-3	150	96	Surface	19	80
				Core wire	20	100
plate	P-1	—	—	Surface	18	70
				Internal	18	80
	P-2	—	—	Surface	18.5	90
				Internal	18.5	90

※JIS C 3005 Test methods for rubber or plastic insulated wires and cables

4. ケーブルおよび樹脂の劣化評価

ケーブルおよび樹脂の放射線照射による劣化評価として、AE センサを用いた打音検査装置、およびシュミットハンマで計測した。

4.1 AE 打音検査による劣化評価

AE センサを用いた固有周波数解析は、AE センサが取り付けられた検査対象の状態（重量や形状など）と周囲から受ける拘束の変化を検出し、検査対象の施工状態や健全性を評価する手法である⁸。AE 打音検査装置を Fig. 2 に示す。

AE 打音検査要領を Fig. 4 に示す。Fig. 4 における各計測点において、それぞれ 5 回ずつ打撃して得られる信号波形を高速フーリエ変換 (FFT) し、平均化処理することで周波数分布を得る。ケーブルへの打音検査より得られる周波数分布を Fig. 5 に示す。



Fig. 3 AE Hammering Inspection system

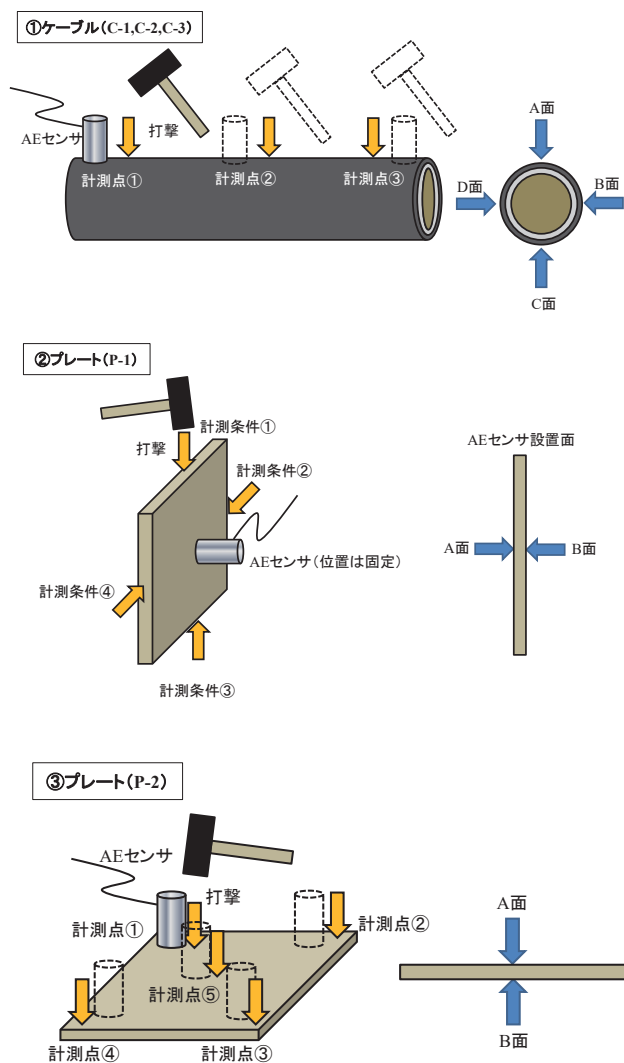


Fig. 4 AE hammering inspection method

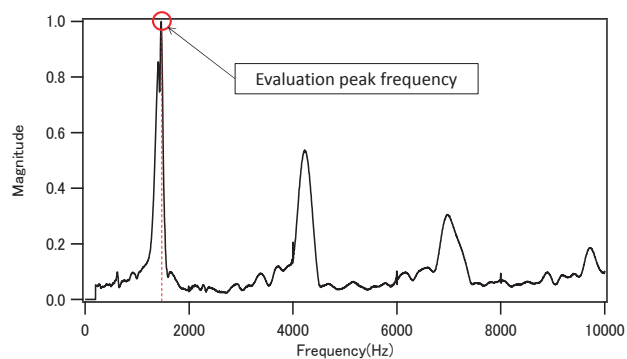


Fig. 5 Frequency distribution (C-1)

4.1.1 AE 打音検査による計測

照射前のケーブル (C-1) における AE 打音検査結果を Fig. 6 に示す。計測点におけるばらつき (図中の誤差棒) は十分小さいため、以降は各試験体において照射前後の評価ピーク周波数の差分で評価する。

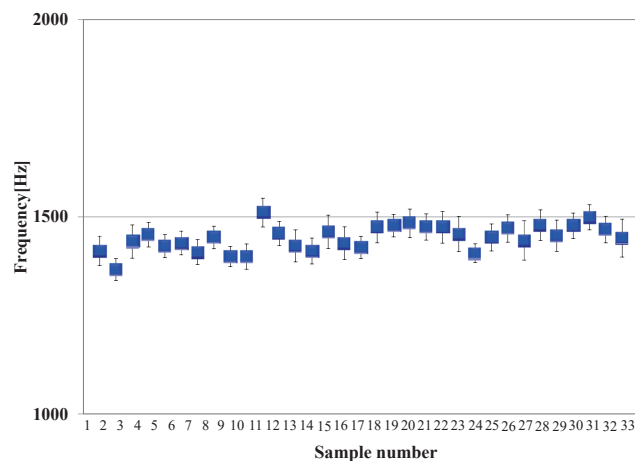


Fig. 6 Peak frequency (C-1, before irradiation)

4.1.2 AE 打音検査結果

照射条件ごと (試験体 3 体ごと) の評価ピーク周波数変化量 (照射後-照射前) のプロットを Fig. 7~Fig. 11 に示す。ケーブル 3 種類、プレート 2 種類のいずれの試験体も、照射後は照射前と比較して評価ピーク周波数が概ね上昇した。これは、電子線照射により試験体が硬化したためと考えられる。

絶縁材料は機械的特性の低下が放射線照射に敏感であり、電気的特性の低下は機械的特性が相当低下した後に現れることが多いことがこれまでの研究で明らかになってきている。

以上から、AE 打音検査により絶縁材の機械的特性劣化を非破壊的に検出することで、電気的特性の低下を事前に検出可能であることを確認した。

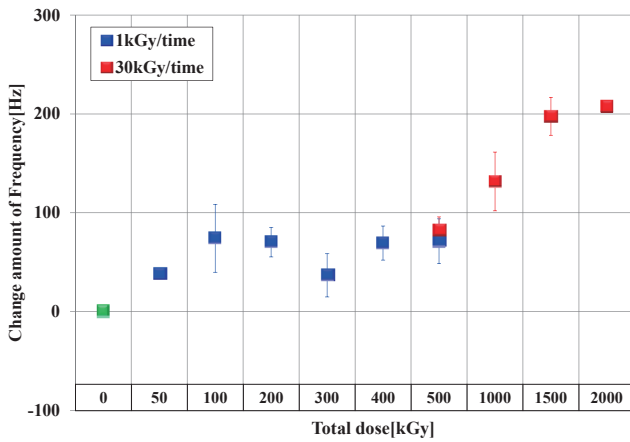


Fig. 7 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-1

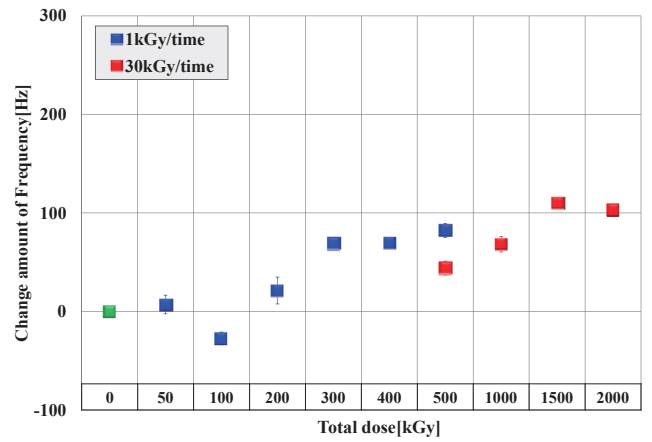


Fig. 10 Influence of irradiation dose on peak frequency, P-1

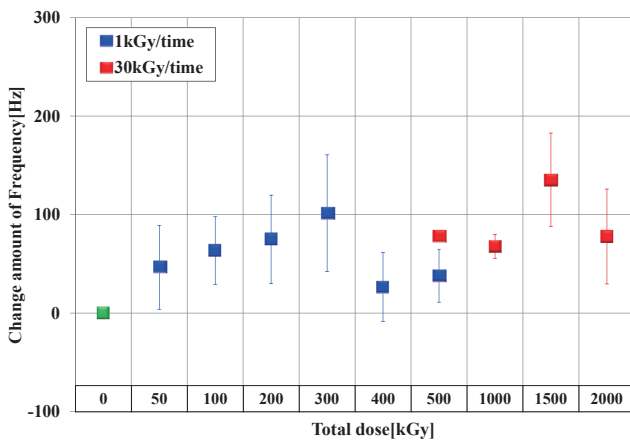


Fig. 8 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-2

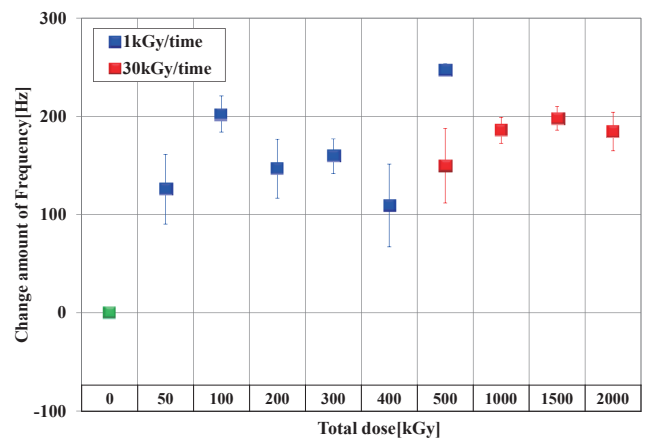


Fig. 11 Influence of irradiation dose on peak frequency, P-2

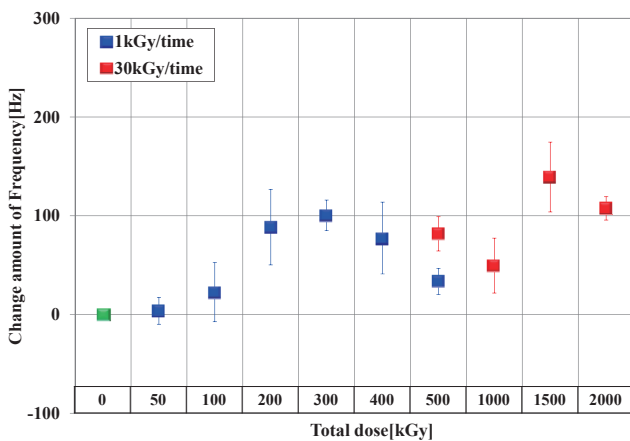


Fig. 9 Influence of irradiation dose on peak frequency, C-3

4.2 シュミットハンマによる劣化評価

シュミットハンマは非破壊的にコンクリートの圧縮強度が測定できる計測器である。シュミットハンマに内蔵されているハンマがバネの力でコンクリート表面を打撃し、その反発度によりコンクリート圧縮強度の推定が可能である¹⁰。ここでは、ケーブルおよび樹脂の放射線照射による劣化の定量評価に用いた。

シュミットハンマによる計測要領を Fig. 12 に示す。なお、打撃時のばらつきを考慮し、1 計測点あたり 5 回ずつ打撃した。

照射前のケーブルおよびプレートの計測結果から、絶縁材料に応じた圧縮強度の計測が可能であることを確認した (Fig. 13 および Fig. 14 参照)。なお、計測条件ごとのばらつきを誤差棒で示す。

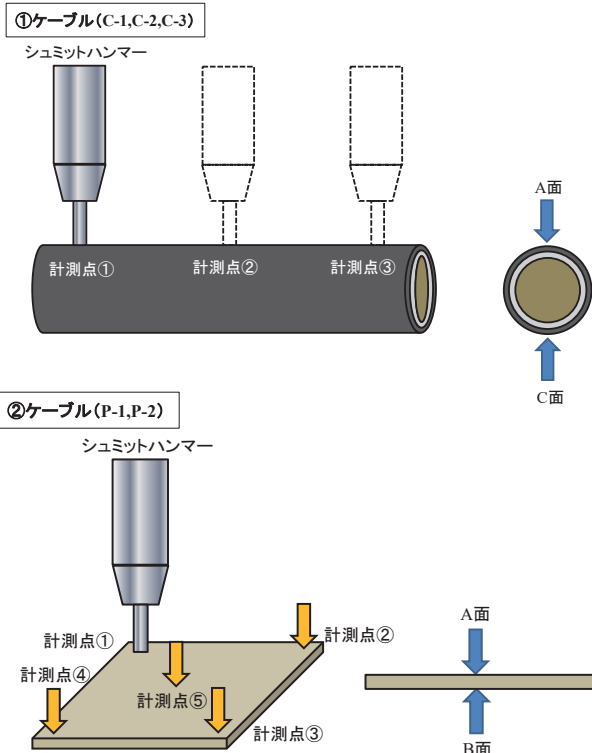


Fig. 12 Schmitt hammer measurement method

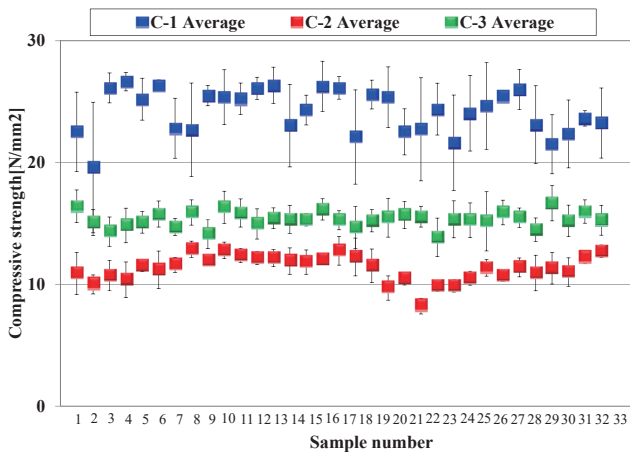


Fig. 13 Compressive strength (C-1,C-2,C-3, before irradiation)

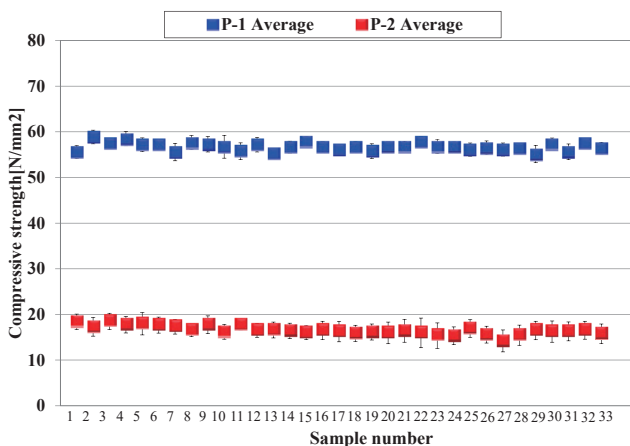


Fig. 14 Compressive strength (P-1 and P-2, before irradiation)

4.2.1 シュミットハンマ計測結果

各照射条件における圧縮強度変化量を Fig. 15～Fig. 19 に示す。なお、同一照射条件の試験体3体ごとのばらつきを図中の誤差棒で示す。

いずれの試験体も照射により圧縮強度が上昇した。なお、C-3において、2000kGy照射した試験体は3体ともシュミットハンマによる計測時に絶縁材の剥離が発生し、機械的強度の大幅な低下を確認した。

以上から、シュミットハンマ計測により照射にともなう絶縁材の劣化（硬化に伴う圧縮強度の上昇）を検出可能であることを確認した。また、劣化傾向はAE打音検査と同じ傾向であることを確認した。

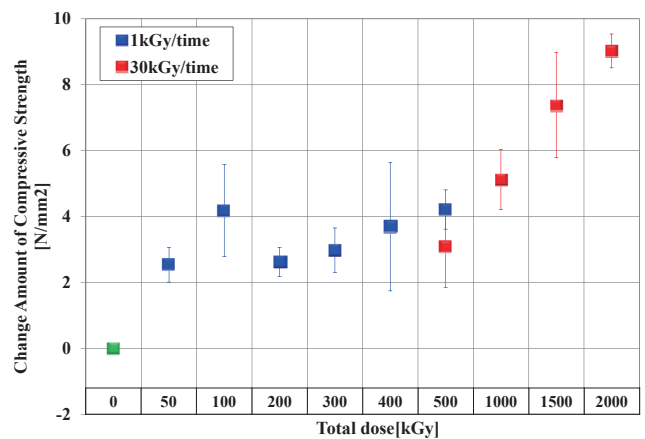


Fig. 15 Influence of irradiation dose on compressive strength, C-1

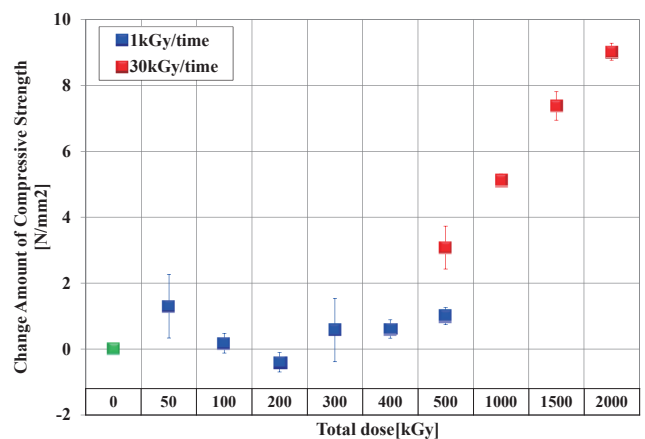


Fig. 16 Influence of irradiation dose on compressive strength, C-2

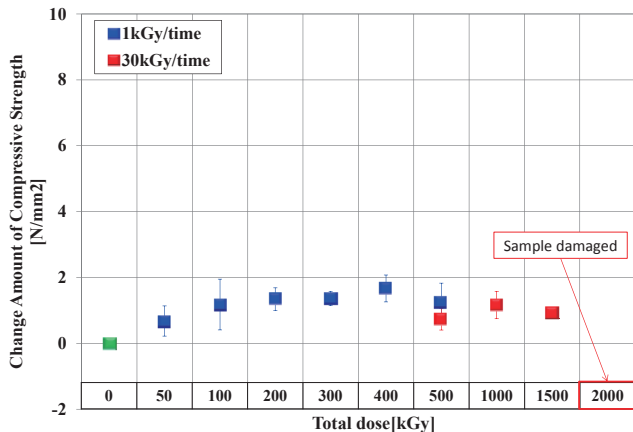


Fig. 17 Influence of irradiation dose on compressive strength, C-3

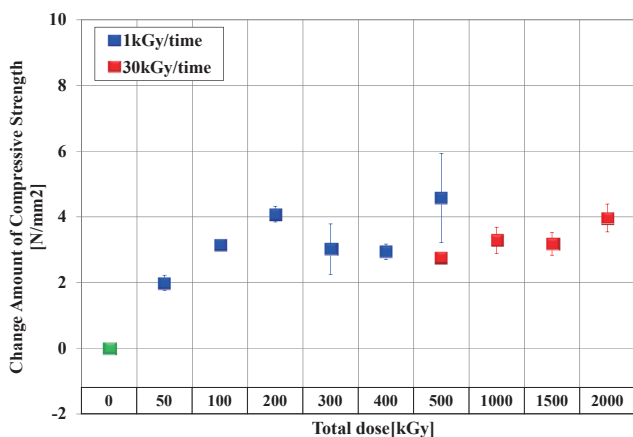


Fig. 18 Influence of irradiation dose on compressive strength, P-1

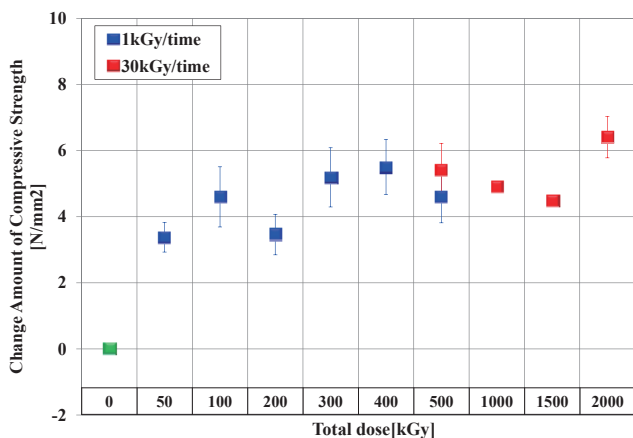


Fig. 19 Influence of irradiation dose on compressive strength, P-2

5. まとめ

本開発結果から得られた知見を整理する。

- ケーブルへの電子線照射により、AE 打音検査で得られる固有周波数、およびシュミットハンマ計測で得られる圧縮強度はいずれも上昇し、照射に伴う絶縁材の劣化を検出可能

- 照射中の温度計測結果から、本開発の照射条件の範囲において、照射に伴う熱の影響は限定的
- AE 打音検査、シュミットハンマ計測において、集積線量 (1kGy/回,30kGy/回) の影響は限定的であったことから、本開発の照射条件の範囲におけるケーブル絶縁材の劣化の進行度は、吸収線量 (総量) に依存し、集積線量には依存しない

参考文献

- [1] “ケーブル絶縁材料の経年劣化研究” JAEA-Review 2012-027
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2012-027.pdf>
- [2] “原子力発電所の低圧ケーブル非破壊劣化診断技術” 三宅悟
http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/1998_5J098_107.pdf
- [3] “インデインターモジュラス (IM) 法のケーブル状態監視ラウンドロビン試験結果の評価について” INSS JOURNAL Vol. 23 2016 R-2
http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/2016_23J160_167.pdf
- [4] “高浜発電所 1,2 号炉の劣化状況評価 (電気・計装品の絶縁低下)” 平成 27 年 12 月 10 日
<http://www.nsr.go.jp/data/000132661.pdf>
- [5] “10MeV 電子線の特徴” 関西電子ビーム(株)
<http://www.kbeam.co.jp/kenkyu/#TOKUCHO>
- [6] “電子線照射技術の工業利用” 中井康二 他
日新電機技報 Vol.54, No.2 (2009.10)
- [7] “高浜発電所 1 号炉ケーブルの技術評価書”
<http://www.nsr.go.jp/data/000032350.pdf>
- [8] “AE センサを用いた打音検査によるボルトの健全性、施工品質点検システムの開発” 匂坂充行 他
日本原子力学会 2017 年秋の大会
- [9] “高分子系材料の耐放射線特性とデータ集”
日本原子力研究所 2003 年 9 月
- [10] “シュミットハンマー取扱説明書” 富士物産(株)
http://www.eg.aktio.co.jp/product_pdf/torisetsu_038-1_NR.pdf